

Plasmadynamische Simulation von Schaltlichtbögen in Luft

Lindmayer, Manfred

Veröffentlicht in:
Jahrbuch 2000 der Braunschweigischen
Wissenschaftlichen Gesellschaft, S.81-88



J. Cramer Verlag, Braunschweig

MANFRED LINDMAYER, Braunschweig

Plasmadynamische Simulation von Schaltlichtbögen in Luft

Braunschweig, 11.2.2000 *

1. Einführung

In den elektrischen Energieversorgungsnetzen kommt den Schaltgeräten neben dem betriebsmäßigen Ein- und Ausschalten eine wichtige Sicherheitsfunktion zu, die darin besteht, daß bei Fehlern im Netz der dabei fließende Kurzschlußstrom im Hundertstel-Sekunden-Zeitmaßstab sicher unterbrochen wird. Dies erfolgt durch das bei der rasch eingeleiteten Kontakttrennung entstehende heiße, zunächst noch gut leitfähige Plasma, den sog. Schaltlichtbogen. In Niederspannungsnetzen, d.h. Netzen mit Betriebsspannungen bis 1000 Volt, geschieht dies ausschließlich an ruhender Umgebungsluft, wobei der Lichtbogen durch Magnetfelder – sie werden i.a. durch geeignete Stromführung in den Elektroden vom abzuschaltenden Strom selbst erzeugt, siehe Bild 5 – verlängert und in ein Löschsystem hineinbewegt wird, wo er infolge Energieentzug verlischt.

Das Lichtbogenverhalten in solchen Anordnungen ist ein außerordentlich komplexes Phänomen, das sich bisher einer Vorausberechnung weitgehend entzog. Dank der starken Fortschritte in der Rechentechnik rückt in jüngerer Zeit die Komplett-Simulation dieses Verhaltens zunehmend in den Bereich des Möglichen, so daß bei der Schaltgeräteentwicklung experimenteller Aufwand und damit Zeit und Kosten reduziert werden können. Nachfolgend wird über mit DFG-Unterstützung durchgeführte Arbeiten auf diesem Gebiet berichtet. Details und weitere Literatur sind in [1-3] enthalten.

Bild 1 zeigt ein Schema der miteinander gekoppelten Vorgänge im Schalterplasma zwischen den Elektroden („Lichtbogensäule“), Bild 2 derjenigen am Übergang zu den Elektroden. Da alle Prozesse auf das Gesamtverhalten Einfluß nehmen, muß eine realistische Simulation diesem Rechnung tragen. Wegen der Geometrie von Schaltgeräten ist darüberhinaus eine dreidimensionale Nachbildung sinnvoll.

2. Simulationsverfahren

Trotz der sehr unterschiedlichen physikalischen Bedeutung der „Bausteine“ der Schemata von Bild 1 und 2 lassen sich alle physikalischen Zusammenhänge mit einem in Bild 3 dargestellten einheitlichen Typus von partieller Differentialgleichung 2. Ordnung, der allgemeinen Transportgleichung, beschreiben. Sie stellt die Basis für die bekannten Bilanzgleichungen der Strömungsmechanik dar, ist aber auch auf das elektrische Potential- bzw. Stromflußfeld oder auf das magnetische Feld (Vektorpotential-Formulierung) anwendbar.

* Kurzfassung eines Vortrags vor der Klasse für Ingenieurwissenschaften der Braunschweigischen Wissenschaftlichen Gesellschaft.

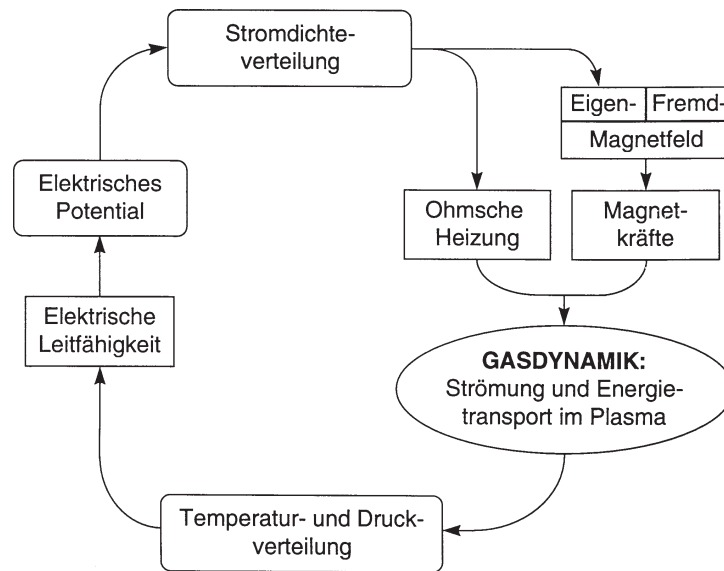


Bild 1: Gekoppelte Prozesse im Plasma („Säule“) eines Schaltlichtbogens.

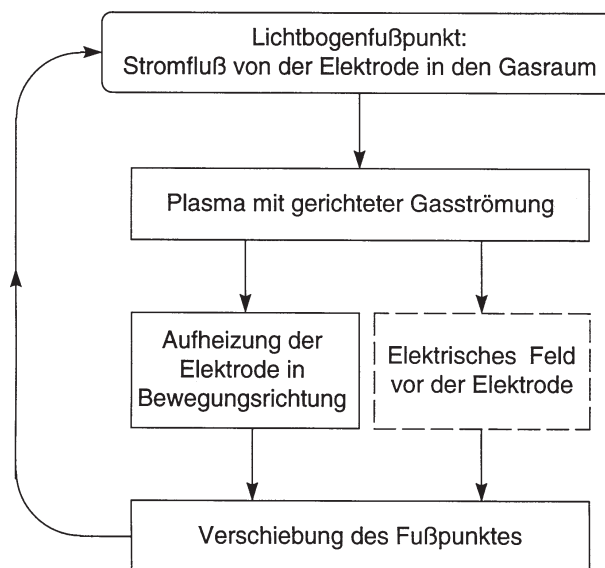


Bild 2: Gekoppelte Prozesse am Übergang zwischen Elektroden und Plasma.

$\frac{\partial(\rho \Phi)}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho \vec{v} \Phi) - \operatorname{div}(\Gamma_{\Phi} \operatorname{grad} \Phi) = S_{\Phi}$
<div style="display: flex; justify-content: space-around;"> transienter Term konvektiver Term diffusiver Term Quell- Term </div>
<p>ρ Dichte, \vec{v} Strömungsgeschwindigkeit des Mediums Γ_{Φ} Diffusionskoeffizient der transportierten Größe Φ, Φ transportierte physikalische Größe, wie</p> <ul style="list-style-type: none"> • Enthalpie H • Geschwindigkeitskomponenten v_x, v_y, v_z • elektrisches Potential U • Komponenten des magn. Vektorpotentials A_x, A_y, A_z • $\Phi = 1$

Bild 3: Typus der allgemeinen Transportgleichung.

Je nach beschriebener physikalischer Größe sind nicht alle Terme vorhanden. Auch unterscheiden sich die Quellterme voneinander. Es entsteht somit ein System mehrerer Differentialgleichungen des Typs gemäß Bild 3. Zur mathematischen Beschreibung gehören weiterhin zahlreiche temperatur- und druckabhängige Plasmaeigenschaften, sowie die physikalischen Gegebenheiten an den Rändern und dem Übergang zwischen Metall und Plasma. Wegen weiterer Einzelheiten sei auf die Literatur [1-3] verwiesen. Das Gleichungssystem wurde in ein kommerzielles Strömungsberechnungs-Programms implementiert. Die numerische Lösung liefert die zeitlichen Verläufe der in Bild 4 aufgeführten physikalischen Größen und damit Informationen über das gesamte Lichtbogenverhalten.

3. Simulationsbeispiele

Bild 5 zeigt eine typische Löschkammergeometrie von Niederspannungsschaltern. Der Lichtbogen entsteht im unteren Parallelbereich der Laufschienen-Elektroden (in Wirklichkeit durch Trennung der stromdurchflossenen Kontakte, in der Simulation durch eine Anfangsrechnung). Infolge des schleifenförmigen Stromverlaufs entstehen Magnetkräfte, die den Lichtbogen nach oben beaufschlagen. Er soll sich im V-förmigen Bereich verlängern und schließlich im oberen Bereich angelangen. Die die Elektroden umgebende geschlossene Kammer aus Isolierstoffwänden besitzt oben Ausblaslöcher, durch die ein Druckausgleich mit der Umgebung stattfinden kann („Verdämmung“).

Bild 6 gibt als typisches Simulationsergebnis die berechnete Temperaturverteilung im Kammerinneren, wobei aus Symmetriegründen nur die linke Hälfte der Geometrie von Bild 5 berechnet und dargestellt ist, zu verschiedenen Zeiten nach Lichtbogenzündung wieder. Die heißesten = hellsten Stellen führen den meisten Strom. Sehr schön ist die

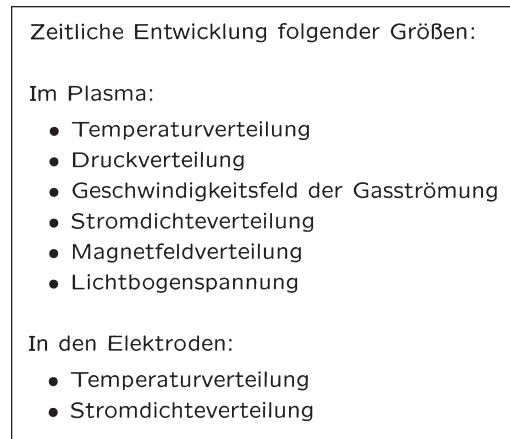


Bild 4: Ergebnisgrößen der Simulation.

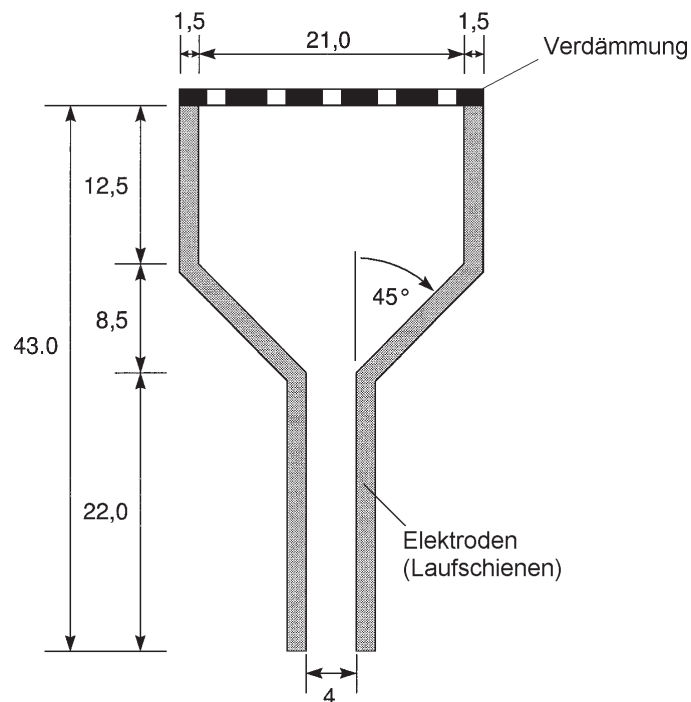


Bild 5: Typische Elektrodengeometrie mit V-förmig aufgeweiteten Laufschiene

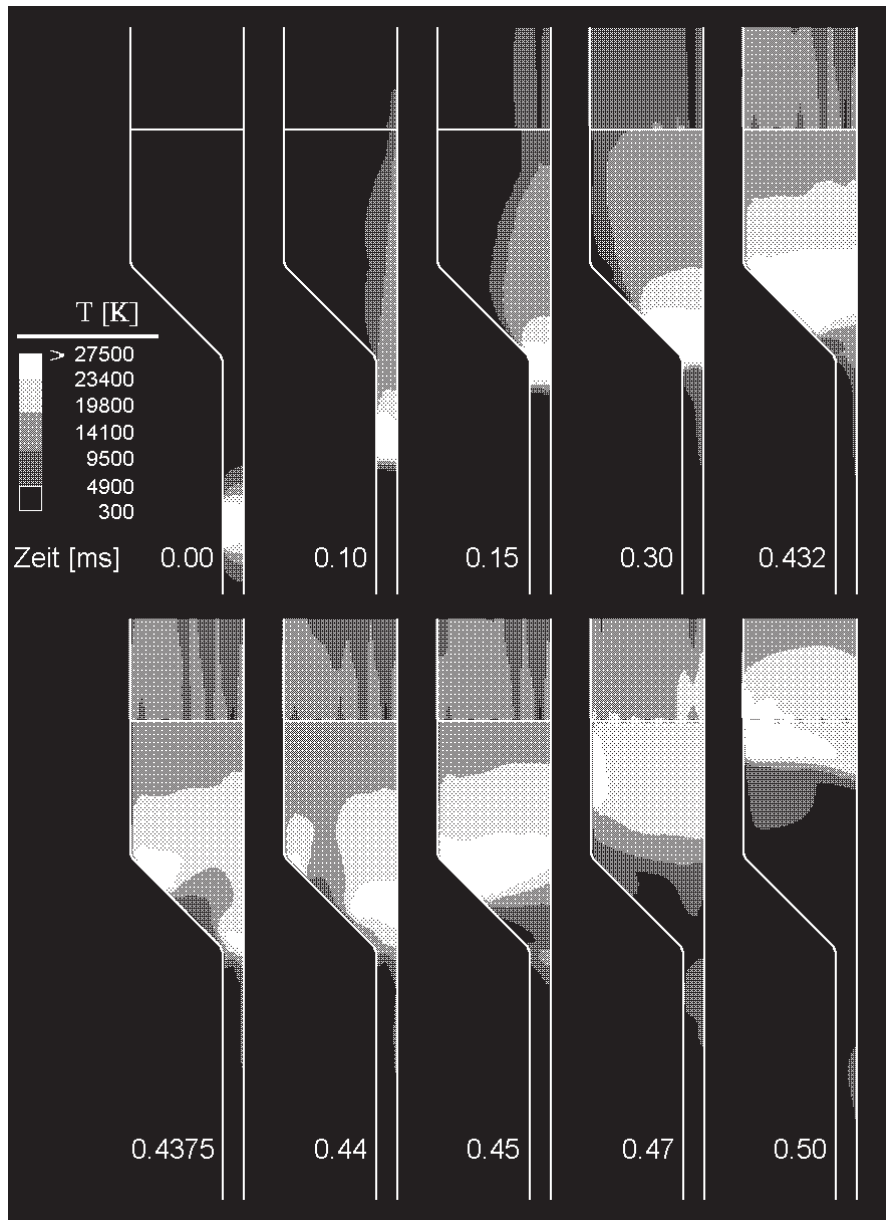


Bild 6: Simulierte zeitliche Temperaturen in Löschkammer mit V-förmigen Elektroden.
Strom 8 kA, 50 Hz.

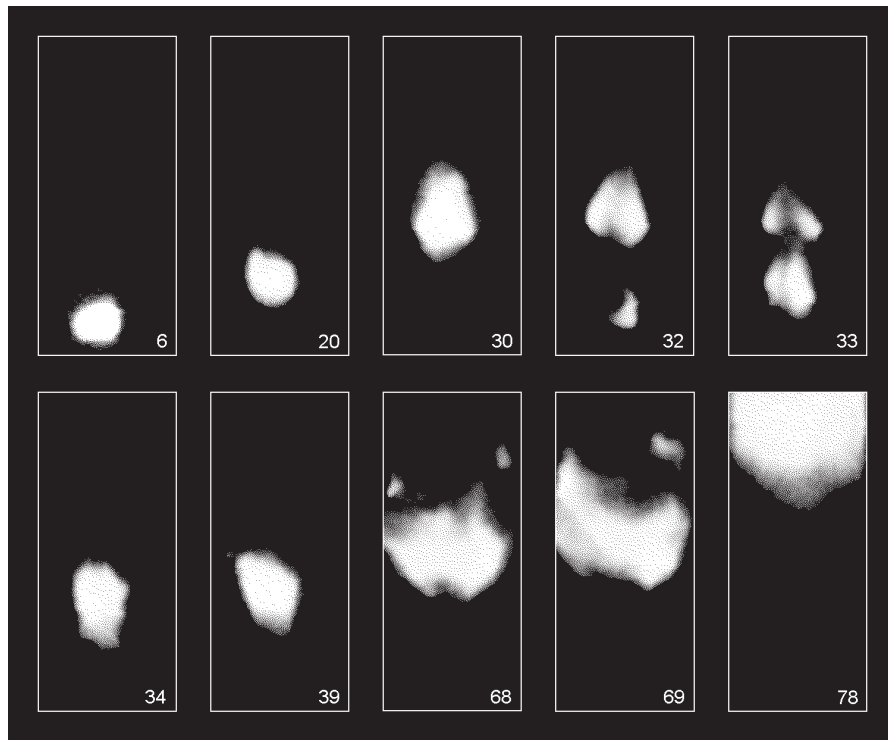


Bild 7: Hochgeschwindigkeits-Filmaufnahmen eines 50 Hz-Lichtbogens in Löschkammer mit V-förmigen Elektroden.

Strömung des Plasmas und die Gesamt-Verlagerung unter dem Einfluß der Magnetkräfte nach oben zu erkennen. Auch das Ausblasen durch die Löcher der Verdämmung (= oberer Querstrich) ist gut zu erkennen. Nach 0.15 ms ist die Aufweitungsstelle erreicht. Dort verlängert sich der Lichtbogen nicht, wie gefordert, verzögerungsfrei, sondern er verharrt zunächst bis 0.3 ms. Bei 0.432 ms hat er sich im V-förmigen Bereich verlängert, jedoch erfolgt kurz darauf ein Rückzünden (0.4375 – 0.44 ms), gefolgt von Wieder-Verlängerung und evtl. weiteren Rückzündungen. Wie sich bei der Analyse der Simulationsergebnisse zeigt, ist für die Rückzündungen die infolge der Verlängerung zunächst angestiegene Lichtbogenspannung verantwortlich, welche über den unteren, noch nicht ausreichend abgekühlten Plasmabereich einen erhöhten Strom treibt, der diesen Bereich wieder aufheizt. Erst bei 0.47 ms befindet ist der Lichtbogen im oberen Parallelbereich endgültig verlängert, bei 0.50 ms ist er an der Verdämmung oben angelangt.

Bild 7 zeigt zum Vergleich einige Teilbilder von Hochgeschwindigkeits-Filmaufnahmen eines Lichtbogens in einer Anordnung ähnlich Bild 5 im Experiment. Im Unterschied zu

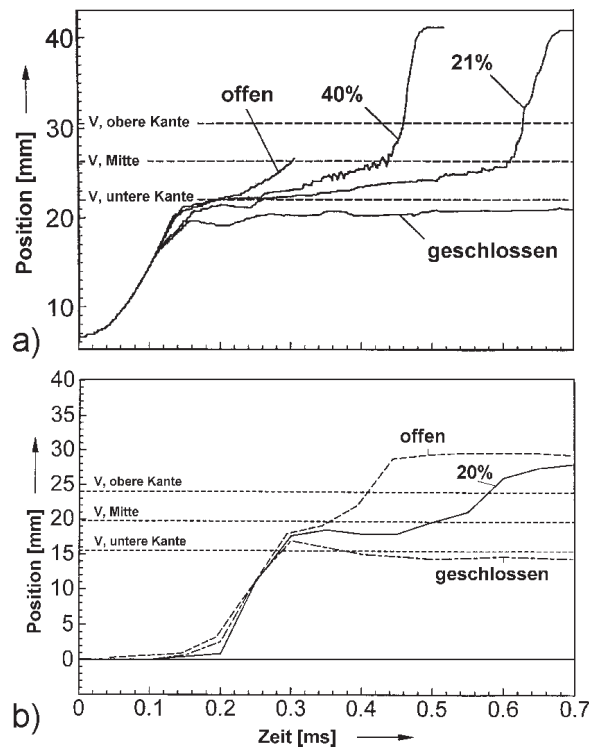


Bild 8: Weg-Zeit-Verlauf des Lichtbogenschwerpunktes an den Elektroden bei unterschiedlichem Anteil der Ausblasöffnung in der Verdämmung.

a) Simulation b) Experiment

Bild 6 ist die volle Geometrie aufgenommen. Der obere Bildrand entspricht der Unterkante der Verdämmung. Alle in der Simulation auftretenden Phasen treten auch in Wirklichkeit auf. Insbesondere ist das Hängenbleiben an der Aufweitungsstelle und die Rückkommutierung in den unteren Bereich zu erkennen (Teilbilder 30 – 39). Diese Vorgänge wiederholen sich mehrmals (nicht wiedergegeben). Erst bei Teilbild 69 ist die volle Länge erreicht, bei Teilbild 78 ist der Lichtbogen oben.

Vergleiche zwischen Rechnung und Experimenten erweisen, daß das Simulationsverfahren nicht nur das grundsätzliche Verhalten wiedergibt, sondern daß in vielerlei Hinsicht quantitative Übereinstimmung vorliegt. Dies soll Bild 8 zeigen. Hier wurde der Anteil des Ausblasloch-Querschnitts an der Gesamtfläche der Verdämmung verändert. Dargestellt ist der Weg-Zeit-Verlauf des Schaltlichtbogens. Die Abhängigkeit vom Ausblasquerschnitt – Mißlingen der Verlängerung bei vollständig geschlossener Kammer, weil die kalte Luft vor dem Lichtbogen nicht entweichen kann, Verbesserung mit zunehmendem Querschnitt – wird ausgezeichnet wiedergegeben. Auch die Wanderungsgeschwindigkeiten

(= Steigung im Weg-Zeit-Verlauf) stimmen recht gut überein. Die zeitliche Verschiebung beruht auf der mechanischen Kontakttrennung, die in der Simulation nicht berücksichtigt ist.

4. Zusammenfassung, Ausblick

Das entwickelte Simulationsverfahren eignet sich trotz zahlreicher Vereinfachungen, die bei der Modellierung noch gemacht werden mußten, recht gut zur Nachbildung der komplexen Vorgänge in Kontakt- und Löschsystemen von Niederspannungs-Schaltgeräten. Zum einen ist damit die physikalische Interpretation auftretender Phänomene und die systematische Suche nach Verbesserungen möglich. Andererseits rückt bei weiterhin rasch fortschreitender Rechentechnik die Verwendung als Werkzeug für Optimierungen bei der Schaltgeräte-Konstruktion in greifbare Nähe.

5. Literatur

- [1] KARETTA, F.: Dreidimensionale Simulation wandernder Schaltlichtbögen. Dissertation TU Braunschweig 1998.
- [2] LINDMAYER, M.: Dreidimensionale Simulation wandernder Lichtbögen – ein Beispiel aus der Schaltgeräteforschung. Abhandlungen der Braunschweigischen Wissenschaftlichen Gesellschaft, Band XLVII, 1996, Verlag Erich Goltze, Göttingen 1997.
- [3] KARETTA, F., LINDMAYER, M.: Simulation of Arc Motion Between Divergent Arc Runners. 19th Int. Conf. on Electric Contact Phenomena, Nürnberg 1998.

Prof. Dr.-Ing. Manfred Lindmayer
Am Papenholz 15
D-38104 Braunschweig